УДК 631.347.4

В.А. ЧЕРНОВОЛОВ, Л.В. КРАВЧЕНКО

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ НАСАДОК НА ТРУБОПРОВОДЕ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ФРОНТАЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Исследовано снижение энергоемкости дождевания применением на машинах низконапорных насадок. На основе математических моделей и экспериментальных данных о функциях распределения осадков по углу зоны дождевания и по ее радиусам $f(\alpha)$ и $f(\rho)$ рассчитаны оптимальные расстояния между насадками на трубопроводе при различных значениях давления, диаметра выходного отверстия насадки и высоты ее установки. Предложены способы размещения насадок на трубопроводе по условиям соблюдения заданной дозы и равномерности полива на всей длине трубопровода.

Ключевые слова*: дождевание, машина фронтального действия, оптимизация, резмещение насадок.*

Введение. Одним из направлений снижения энергоемкости дождевания является применение на дождевальных машинах низконапорных насадок и дождевальных аппаратов.

Разработанные в Ставропольском НИИГиМ дождевальные насадки секторного действия работают при пониженном давлении. Их применение на машине позволяет снизить энергоемкость примерно в два раза.

Пьезометрическая линия трубопровода дождевальной машины имеет нисходящий характер, поэтому насадки работают при различном рабочем давлении. Если с целью снижения энергоемкости не применять дроссели для выравнивания давления перед насадками, то равномерности дождевания по длине трубопровода можно достигнуть за счет изменения расстояния между насадками, их диаметра или высоты установки.

Задача оптимизации формулируется так. На основе математических моделей и экспериментальных данных о функциях распределения осадков по углу зоны дождевания и по ее радиусам $f(\alpha)$ и $f(\rho)$ рассчитать оптимальные расстояния между насадками на трубопроводе при различных значениях давления, диаметра выходного отверстия насадки и высоты ее установки. Результаты расчетов представить в виде уравнения. Используя пьезометрическую линию, уравнение регрессии для оптимального по равномерности дождевания, расстояния между насадками $B_{опт} = f(P, H, d)$ и расходные характеристики насадок, решить задачу оптимального размещения насадок на трубопроводе. При этом необходимо выполнить условия соблюдения заданной дозы полива на всей длине трубопровода и работы насоса дождевальной машины с полной производительностью при максимальном КПД. Последние условия диктуются требованиями максимальной производительности и энергосбережения. Задача оптимизации может иметь не одно решение, поэтому требуется просчет нескольких вариантов или последовательных приближений и выбор лучшего из них.

Методика исследований. Исходными данными для расчета служат:

- общая длина трубопровода *B,* м;
- уравнения, или графики, расходных характеристик насадок:

$$Q = f_1(P, d);$$

•уравнения регрессии параметров зоны дождевания от давления, высоты и диаметра насадок:

$$m_\rho = f_2(P, H, d),\ \sigma_\rho = f_3(P, H, d),\ \sigma_\alpha = f_4(P, H, d);$$

$$m_\rho = 0{,}88626+4{,}67498 \cdot P+0{,}317342 \cdot d+0{,}3477 \cdot H-1{,}7385 \cdot P \cdot H; \quad (1)$$

$$\sigma_\rho = 0{,}6528726+0{,}17202 \cdot H+0{,}06918 \cdot d; \quad (2)$$

$$\sigma_\alpha=0{,}128202+0{,}70926 \cdot P-0{,}10595 \cdot P \cdot d+0{,}16986 \cdot d-0{,}013883 \cdot d \cdot -0{,}014285 \cdot d^2; \quad (3)$$

•математическая модель процесса дождевания;

•норма полива W, $м^3$/га, или *N=W/10,* мм;

•допускаемая неравномерность $[V]$ и предельная интенсивность дождя *[I],* мм/мин;

•характеристика насоса при модернизации машины или каталог характеристик при проектировании новой машины.

При проектировании новой машины определяем расход $Q_н$ и давление $P_н$, которые должен давать насос. Допустимую интенсивность дождевания $[I]$: для стационарных систем: 0,1…0,2 мм/мин – для тяжелых почв; 0,2…0,3 мм/мин – для суглинка; 0,5…0,8 мм/мин – для легких почв. Для машин, работающих в движении, допустимую интенсивность принимают примерно в 1,5 раза больше.

Проектный распределительный расход – количество воды в литрах, выливаемой в единицу времени с одного метра трубопровода,

$$q_e = \frac{Q_н}{B},\ л/(с \cdot м), \quad (4)$$

где $Q_н$ – объемная подача воды насосом, л /с; *B* – длина трубопровода машины,м.

Размер зоны дождевания в направлении движения машины обозначим $Y_{эф}$. Так как

$$I = \frac{60 \cdot q_e}{Y_{эф}} \leq [I],$$

то

$$Q_н \leq \frac{[I] \cdot Y_{эф} \cdot B}{60},\ \frac{л}{c}. \quad (5)$$

Давление в трубопроводе в месте установки насадки, наиболее удаленной от насоса, принимают по технической характеристике насадки.

Потери давления в трубопроводе считают на основании гидравлического расчета [1] .

Давление, создаваемое насосом $P_н$, находят как сумму статического и динамического давлений:

$$P_д = \frac{\rho \cdot Q^2}{2 \cdot F_{тр}^2}, \quad (6)$$

где *Q* – расход воды через крыло трубопровода; *F* – площадь сечения трубопровода, $м^2$; *ρ* – плотность воды, кг/$м^3$.

По $P_н$ и $Q_н = 2 \cdot Q$ выбирают насос. Рабочая точка должна находиться в зоне максимального КПД.

При модернизации машины пониженное давление при неизменном расходе можно получить путем замены насоса. Далее вычисляют $q_e = \dfrac{Q_н}{B}$ и выбирают скорости движения по заданным нормам полива.

Норма полива *N*, л/м^2, или слой дождя в миллиметрах,

$$N = \frac{q_e}{V_м}, \quad (7)$$

откуда

$$V_м = \frac{q_e}{N}. \quad (8)$$

Если задан диапазон норм полива, то вычисляют диапазон скоростей. Если скорость $V_м$ не соответствует технической характеристике машины, то изменяют число проходов *m* машины для получения заданной нормы полива и приемлемой скорости.

$$V_м = \frac{Q_н \cdot m}{B \cdot N}. \quad (9)$$

Постоянство дозы полива обеспечивается изменением расстояния между насадками и увеличением диаметра насадки на конце трубопровода.

Расходные характеристики насадок в виде формул $Q_d = f(P,d)$ получаем по результатам опытов или по литературным источникам [2].

Результаты моделирования. Распределение воды одной насадкой после прохода машины характеризуют эпюрой дозы полива вдоль линии, перпендикулярной к линии движения [2]. Предпочтительной считается одновершинная эпюра дозы одной насадки. Тогда уменьшение расстояния между насадками на трубопроводе, то есть перекрытие зон дождевания, сначала приводит к снижению неравномерности (рис.1), а затем – к её повышению. Расстояние $B_{опт}$ между насадками, при котором неравномерность распределения воды минимальна, называем оптимальным. Если на графике провести линию допустимой неравномерности, то разность абсцисс точек пересечения этой линии с кривой неравномерности дает диапазон допустимых расстояний между насадками. Например, при $[V] = 10\%$ и d=7 по графику B_{min} = 8м, а $B_{max} \approx$ 12м. Зависимость $B_{опт} = Ф(P,H,d)$ получили моделированием.

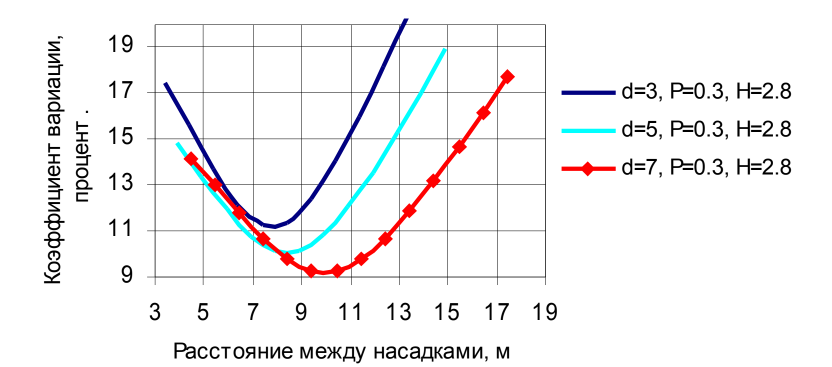


Рис. 1. Влияние расстояния между насадками

на коэффициент вариации дозы полива

Вычислительный эксперимент строили по некомпозиционному плану второго порядка при трех факторах: давление *P*, высота установки *H* и диаметр выходного отверстия насадки *d*. План включает пятнадцать вариантов расчета. В каждом варианте найдены B_{onm} при соответствующих $\sigma_\alpha, \sigma_\rho, m_\rho$ и получено уравнение регрессии $B_{onm} = \Phi(P, H, d)$.

Моделирование выполнено по вероятностным математическим моделям [3]. Для оценки адекватности уравнения регрессии вычисления B_{onm} проведены для всех повторностей и для средних значений m_ρ, σ_ρ и σ_α. В каждом варианте найдено оптимальное по равномерности распределения перекрытие. Неравномерность при оптимальном перекрытии обычно не превышала 12%.

По результатам моделирования получено уравнение регрессии

$$B_{onm} = 7{,}1492 - 0{,}08249 X_1 + 0{,}5298 X_2 + 0{,}7749 X_3 - 0{,}0521 X_1X_2 - 0{,}24998 X_1X_3 + 0{,}2500 X_2X_3 - 0{,}2485 X_1^2 - 0{,}2485 X_2^2 - 0{,}4985 X_3^2, \quad (10)$$

где $X_1 = \dfrac{P - 0{,}2}{0{,}1}$; $X_2 = \dfrac{H - 2{,}2}{0{,}6}$; $X_3 = \dfrac{d - 5}{2}$. (11)

В раскодированном виде уравнение (10) имеет вид

$$B_{onm} = 3{,}447 \cdot P + 4{,}615 \cdot H + 1{,}425 \cdot d - 0{,}868 \cdot P \cdot H - 0{,}125 \cdot P \cdot d + 0{,}208 \cdot H \cdot d - 0{,}249 \cdot P^2 - 0{,}69 \cdot H^2 - 0{,}125 \cdot d^2 - 6{,}795. \quad (12)$$

Уравнение адекватно при пятипроцентном уровне значимости, все коэффициенты значимы. График уравнения B_{onm} в натуральных переменных показан на рис.2.

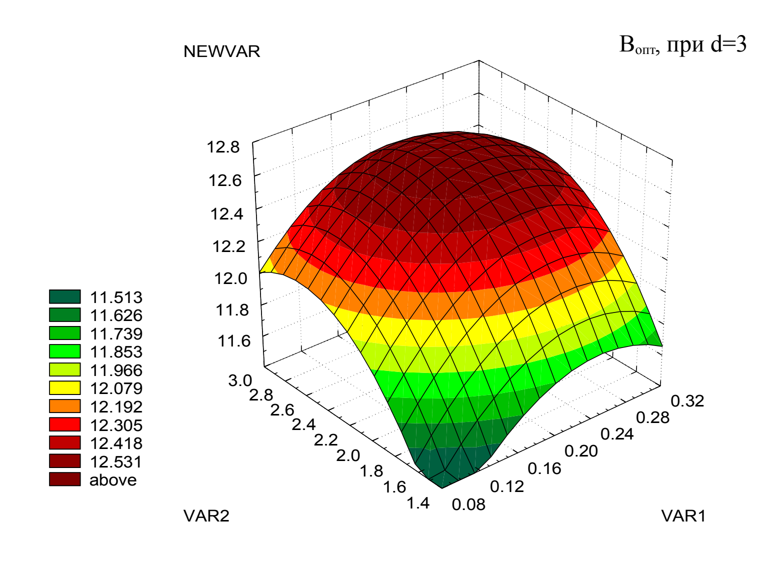


Рис.2. Оптимальное расстояние между насадками

P

по условию минимума неравномерности (var1 = P; var2 = H)

Результаты исследования уравнения регрессии на максимум приведены в таблице.

Максимальные значения $B_{опт}$ и их координаты

При d, мм	Максимум $B_{опт}$	Координаты максимума	
		Р	Н
3	12,612	0,22	2,3
5	14,124	0,17	2,8
7	14,876	0,12	3,2

Способы размещения насадок. Близкий к известному *первый способ размещения насадок* включает нахождение расчетного давления в месте установки наиболее удаленной насадки, выбор номера насадки и шага установки для получения проектного расхода. Все другие насадки одного диаметра располагают с таким же шагом, но для выравнивания рабочего давления перед насадками, расположенными ближе к насосу, устанавливают дроссели и давление регулируют с помощью прибора. Этот способ связан с повышенными энергозатратами на дросселирование, но позволяет получить более высокую равномерность дождевания. Для всех насадок, имеющихся в каталоге производителя, вычисляют расход $Q_{d,i}$ и ширину $B_{опт,,i}$ при расчетном давлении. Выбирают первую насадку по условию получения проектного расхода

$$\frac{Q_{d,1}}{B_{опт,1}} = \frac{Q_н}{B}. \qquad (13)$$

Несколько таких насадок размещают с шагом $B_{опт,,1}$. В каждой точке установки насадки вычисляют рабочее давление и проверяют возможность перехода на меньший диаметр насадки. В точке, где выполнено условие $\frac{Q_{d,2}}{B_{опт,2}} = \frac{Q_н}{B}$, устанавливают насадку второго типоразмера. Несколько таких насадок размещают с шагом $B_{опт,,2}$. Если условие (13) выполняется приближенно, то уточняют расстояние между насадками $B_{d,i}$. Из условия равенства распределенных расходов $\frac{Q_н}{B} = \frac{Q_{d,i}}{B_{d,i}}$ получим

$$B_{d,i} = \frac{Q_{d,i} \cdot B}{Q_н}. \qquad (14)$$

В каждой точке установки насадки вычисляют рабочее давление и проверяют возможность перехода на меньший диаметр насадки, и так далее до разметки всего крыла трубопровода. Наиболее удаленная от насоса насадка в каждом типоразмере работает без дросселя, а всем остальным насадкам группы устанавливают такой же расход путем дросселирования.

Скорость машины определяют по заданной норме полива из уравнения (9).

Второй способ размещения насадок. При статическом давлении в точке установки первой насадки рассчитываем величины Q_d, $B_{опт}$, $B_{\min}$, $B_{\max}$, $\frac{Q_d}{B_{опт}}$, $\frac{Q_d}{B_{\min}}$, $\frac{Q_d}{B_{\max}}$ для всех насадок, имеющихся в наборе. Отношения расхода насадки к расстояниям между ними дают диапазон распределенного расхода, который реализуется данной насадкой. Если $\frac{Q_d}{B_{\min}} \prec q_e$, то насадки можно устанавливать с расстоянием в два раза меньшим от оптимального, но насадки располагают поочередно веером вперед и веером назад по движению машины. Тогда

$$q_{e2} = \frac{Q_н}{2 \cdot B}, \qquad (15)$$

и по этой величине подбираем первую насадку. Давление в трубопроводе постепенно уменьшается при удалении от насоса, поэтому расход насадки Q_d уменьшается, и для получения проектного распределенного расхода q_e по длине трубопровода расстояние между насадками необходимо уменьшать.

Первую насадку при однорядном размещении выбираем по условию

$$\frac{Q_d}{B_{\max}} \le q_e \le \frac{Q_d}{B_{\min}}. \qquad (16)$$

Если выбрать насадку, у которой $\frac{Q_d}{B_{\max}} = q_e$, то есть принять $B_1 = B_{\max}$, то один типоразмер насадки устанавливается на значительной части крыла, переходов на увеличенный диаметр будет меньше.

Если принять $B_1 = B_{опт}$, то будет обеспечена лучшая равномерность дождевания, но потребуется больше типоразмеров насадок.

Координата установки первой насадки $X_1 = 0{,}5 \cdot B_1$. Координата второй насадки предварительно принимается

$$X_2' = X_1 + B_1. \qquad (17)$$

В точке X_2' находим давление P_2 и определяем расход через насадку Q_{d2}. Далее находим ширину B_{2q} по условию постоянства дозы, т.е.

$$B_{2q} = \frac{Q_{d2} \cdot n_p}{N_1 \cdot V_м}, \qquad (18)$$

где n_p - число рядов установки насадок, и вычисляем $X_2 = X_1 + \frac{B_{2q}}{2}$ и $X_3^{'} = X_2 + B_{2q}$. Вычисляем давление P_3 в точке с координатой $X_3^{'}$ и расход через насадку при этом давлении Q_{d3}. Находим $B_{3q} = \frac{Q_{d3} \cdot n_p}{N_1 \cdot V_м}$, далее считаем $X_3 = X_2 + \frac{B_{3q}}{2}$, $X_4^{'} = X_3 + B_{3q}$ и т.д. до конца трубопровода.

Каждый раз проверяем условие $B_{iq} > B_{\min}$.

При переходе через граничное условие меняем диаметр насадки.

Выводы. Оптимальное расстояние между насадками на трубопроводе рекомендуется определять по уравнению регрессии (12), в котором 10 коэффициентов при трех независимых переменных P, H, d.

Первый способ размещения насадок позволяет получить более высокую равномерность дождевания, но требуется регулировка расхода дросселированием насадок, расположенных ближе к насосу.

Второй способ обеспечивает постоянство распределенного расхода по длине трубопровода за счет переменного шага установки насадок. При использоваании для расчета расстояний между насадками адекватного уравнения напорной линии трубопровода дросселирование не требуется, в результате и получается минимальная энергоемкость.

Минимальная энергоемкость и высокая равномерность дождевания получаются при установке первой насадки на расстоянии $0,5B_{опт}$ от начала трубопровода, второй – на расстоянии, вычисляемом по формуле (17), и так далее. Если $B_{i\,q} \leq B_{min}$, то переходят на насадку увеличенного диаметра.

Библиографический список

1. *Лямперт Г.П.* Гидравлический расчет водовода широко-захватных дождевальных машин / Г.П. Лямперт //Новое в технике и технологии полива. - М., 1976. - С.29.

2. *Казаков С.П.* Рациональная расстановка дождевальных насадок / С.П. Казаков // Гидротехника и мелиорация. - 1953. - N4. - С.37-44.

3. *Черноволов В.А.* Методика оптимизации распределения жидкости. / В.А. Черноволов, Л.В. Кравченко, А.М. Крупка // Тракторы и сельхозмашины. - 2004. - №1. - С.8.

Материал поступил в редакцию 28.07.08.

V. CHERNOVOLOV; L. KRAVCHENKO.

THE OPTIMIZATION OF ACCOMMODATION OF THE SPRAYNOZZLE ON THE PIPELINE

OF THE RAINGUN OF CONTINIOUS FRONTAL ACTION

The reduction of power consumption of watering by the raingun with using of the lowpressured spraynozzles was investigated. The optimum distance between the spraynozzles on the pipeline under the various pressure meanings, the diameter of the outlet of the spraynozzle and the height of its installation were reckoned on the basis of the mathematical models and experimental data about the functions of distribution of precipitations on an angle of the watering zone and on its radiuses $f(\alpha)$ and $f(\rho)$.
Two ways of accommodation of the spraynozzles on the pipeline are offered on condition of observation of the given watering zone on all the length of the pipeline and the work of the raingun pump at the maximal efficiency.

ЧЕРНОВОЛОВ Василий Александрович (р.1938), заведующий кафедрой «Механизация растениеводства» ФГОУ ВПО АЧГАА, доктор технических наук (1989). Окончил Азово-Черноморский институт механизации сельхозмашиностроения» (1962).
Научные интересы – механизация внесения удобрений и дождевания.
Имеет 152 научные работы.
luhanunV.A.@meil.ru

КРАВЧЕНКО Людмила Владимировна, доцент кафедры «Математика» ФГОУ ВПО АЧГАА, кандидат технических наук (2003). Окончила Ростовский-на-Дону государственный университет (1994).
Научные интересы – механизация дождевания.
Опубликовала 15 статей.